

文章编号: 2095-4980(2018)04-0645-04

## 海洋背景下雷达测高优化的一种方法

张进华<sup>1</sup>, 黄亮<sup>1</sup>, 范家强<sup>1</sup>, 牛广超<sup>2</sup>

(1.南京电子技术研究所, 江苏 南京 210038; 2.中国人民解放军空军 94620 部队, 350000)

**摘要:** 雷达辐射波在传播过程中受海面对流层波导效应以及回波多径影响, 波导效应导致雷达波束偏离真实位置; 多径效应导致雷达阵面端回波幅度、相位矢量叠加, 限制了雷达的测高精确度。针对岸基雷达海面方位测高精确度误差大, 提出通过反演大气修正参数的方法提高雷达测高精确度。基于目标一次航迹信息、二次雷达高度信息, 通过雷达测高公式拟合大气修正参数, 将拟合后的大气修正参数代替雷达数据处理测高公式中的原  $k$  系数。通过 Matlab 软件统计海面方位大气参数修正前后雷达测高精确度的变化, 实验结果表明, 大气参数修正后雷达测高精确度提高了 50.8%。

**关键词:** 对流层波导; 多路径; 大气修正参数; 测高精确度; 二次雷达

**中图分类号:** TN959.71

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201804.0645

## An optimization method of radar height measurement on sea background

ZHANG Jinhua<sup>1</sup>, HUANG Liang<sup>1</sup>, FAN Jiaqiang<sup>1</sup>, NIU Guangchao<sup>2</sup>

(1.Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210038, China;

2.The 94620 Unit of PLAAF, 350000, China)

**Abstract:** The radar radiation wave is effected by sea tropospheric ducts and echo multipath effect in the propagation, and waveguide effect makes radar beam to deviate from real position. Multipath effect leads to amplitude-phase vector superposition of radar echo on the array, and the height measurement accuracy of radar is limited. Aiming for height measurement error of shore based radar at the sea direction, a method is proposed in which the atmospheric parameters are inverted to improve radar altimeter accuracy. The method is based on the target track information of radar and height information of the Secondary Surveillance Radar, and the atmospheric correction parameters are fitted by the radar altimetry formula, the modified atmospheric parameters instead of the original  $k$  coefficient of radar data processor altimetry formula. The Matlab software is utilized to count the variation of radar height measurement accuracy before and after the correction of the atmospheric parameters over the sea direction. The test results show that the radar height measurement accuracy is increased by 50.8% after the atmospheric parameters are corrected.

**Keywords:** tropospheric ducts; multipath; atmospheric correction parameter; height measurement accuracy; Secondary Surveillance Radar

在现代雷达中, 目标精准定位是衡量一部雷达性能的关键指标, 是协同指挥员对战场态势评估的一种重要依据。然而, 雷达测高受阵地环境、电磁环境、多路径<sup>[1]</sup>以及海面波导效应等因素的影响, 给三坐标雷达测高性能带来了严重的挑战。本文主要讨论了在海洋背景下对流层波导的折射效应<sup>[2]</sup>以及多路径效应对雷达测高的影响, 针对面向大海方位的岸基雷达, 提出了通过优化大气参数提高雷达测高精确度的方法。

### 1 影响雷达测高精确度的主要因素

#### 1.1 海面对流层波导对测高精确度限制

在海洋环境中, 海面对流层波导<sup>[3]</sup>包含了海面波导、蒸汽波导以及抬升波导<sup>[4]</sup>, 其大气波导的影响表征为

对电磁波的吸收<sup>[5]</sup>、散射以及对大气的折射效应<sup>[6]</sup>。大气折射率的变化使得电磁波传播轨迹变化,从而反应在方位、距离上具有不同的能量分布。对微波而言,对流层的大气折射率是大气温度、压强和湿度等变量的函数,这些物理量通常随时间和空间变化,因而大气折射表征在时间和空间上呈现非均匀性。对于对流层陷获折射而言,大气的折射随高度异常下降,使得电磁波在传播过程中波束折向海面,向下弯曲,从而被陷获在一定的大气层结内传播,导致波束指向的不确定性,使得电磁波的传播特性预估变得非常困难。基于大气标准设计的雷达设备,其测高性能评估是在标准大气模型下进行,未能充分考虑海面大气波导突破常规标准大气参数对测高精确度的限制。

### 1.2 多径对测高精确度限制

雷达电磁辐射波阵地周围环境不同,所受的影响不同,其根本原因是来自目标的直达波和其他经多径反射回来的回波。直达波与多径回波在雷达阵面端形成幅度和相位的矢量叠加进入接收通道<sup>[7]</sup>,从而引起幅度和相位的扰动。而这种信号通常不可能从直达波信号中分离出来<sup>[8]</sup>,对于通过比幅测高的雷达来讲,这是雷达测高精确度受到限制的因素之一。

本文对岸基雷达在海面方向,雷达测高精确度偏离真值较大问题,提出了通过实地采集目标数据,以二次高度作为先验真值条件,并依据一次目标距离和仰角反演拟合修正大气<sup>[9]</sup>参数,以修正后的大气参数代入雷达测高公式的办法解决海面方位高度超差大的问题。

## 2 海面方位目标数据分析

基于上述外界因素对雷达大海方位测高精确度的影响,本次试验在整机工作的条件下,分两次全方位采集一次目标航迹与二次航迹数据,大气系数未修正之前采集 12 h,修正之后采集了 12 h。采集的目标航迹数据中包含各批目标的一次航迹信息和二次信息,其中各批目标航迹数据每一点都含有一次目标的距离、方位、仰角、高度和二次高度信息。图 1~3 为不同方位目标在海面和陆地的一次与二次高度对比图。

图 1 利用 EXCEL 绘制了海面方位单批目标一次高度与二次高度,横坐标为方位角度,纵坐标为高度,从图 1 可以看出,在方位区间内,目标一次高度测量值与二次高度偏差很大。

图 2 同样利用 EXCEL 绘制了陆地方位单批目标一次高度与二次高度之间的关系,横坐标为方位角度,纵坐标为高度,从图 2 可以看出,在非海面方位,一次高度与二次高度偏差较小。

图 3 用 Matlab 软件统计了海面方位 12 h 记录的一次雷达与二次雷达在距离、方位上目标一次高度测量值和二次高度的偏差。从图 3 可以看出,在不同方位距离段,目标一次高度与二次高度超差较大。

图 1~图 3 结果表明:雷达辐射波在海面和陆地传播过程中,由于不同的大气环境,雷达辐射波传播轨迹偏离真实位置或出现多路径反射效应,导致雷达测高精确度误差随距离方位非线性变化。

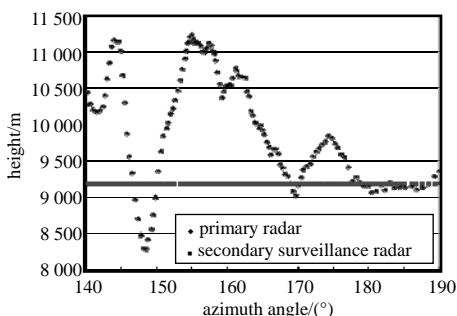


Fig.1 Target height measurement of the primary and secondary surveillance radar over the sea azimuth

图 1 海面方位目标一次高度与二次雷达高度

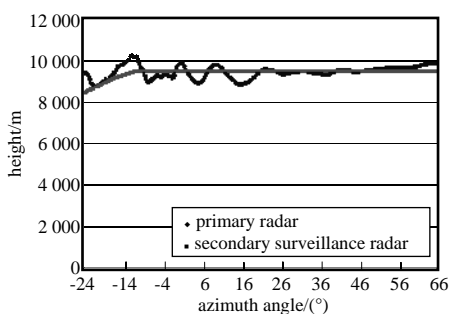


Fig.2 Target height measurement of the primary and secondary surveillance radar over the land azimuth

图 2 陆地方位目标一次高度与二次高度

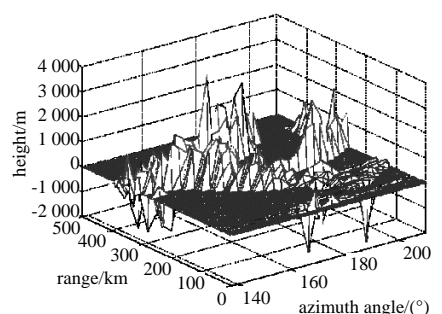


Fig.3 Deviation statistics of height measurement of the primary and secondary surveillance radar over the sea azimuth

图 3 海面方位目标一次高度与二次高度偏差统计

## 3 测高误差修正方法

海面方位大气修正参数未知,实验采用二次雷达高度作为先验真值,利用海面真实目标航迹中的距离、仰角以及雷达架高参数,代入雷达测高公式,反演推算大气修正系数  $k$  在距离、方位、仰角上的变化,然后将获得的大气修正系数  $k$  再次代入雷达测高公式,通过二次修正一次目标测高误差。

$$h_{\text{tgt}} = R_{\text{tgt}} \sin(\theta_{\text{tgt}}) + h_{\text{radar}} + k \frac{R_{\text{tgt}}^2}{2r_{\text{earth}}} \quad (1)$$

式(1)为雷达测高公式,  $h_{\text{tgt}}$ ,  $\theta_{\text{tgt}}$  和  $R_{\text{tgt}}$  分别为真实目标的二次高度、一次雷达测量的仰角和距离;  $h_{\text{radar}}$  为雷达架高;  $r_{\text{earth}}$  为地球半径;  $k$  为大气修正参数。

基于本次试验采集的海面目标航迹数据分析, 目标在 200 km 以内, 200~330 km 之间, 330 km 以外一次高度分布与二次雷达高度超差不同, 试验采取了对海面方位按距离段对大气修正参数  $k$  进行分段修正。根据雷达测高公式, 采用二次高度和一次距离与仰角拟合  $k$  值, 假设  $k$  为目标距离  $R_{\text{tgt}}$  的函数。对目标相同距离、方位, 拟合大气参数公式:

$$k = \begin{cases} 2.8595 \times 10^{-6} R_{\text{tgt}}^2 - 9.11553 \times 10^{-6} R_{\text{tgt}} + 0.7615, & R_{\text{tgt}} < 200 \\ -1.13 \times 10^{-3} R_{\text{tgt}} + 1.20505, & \text{else} \\ -0.0024 R_{\text{tgt}} + 1.792, & R_{\text{tgt}} > 330 \end{cases} \quad (2)$$

图 4 为大气修正系数与距离的关系, 从图 4 得出, 海面不同方位、距离, 大气系数也不同。基于大气系数对雷达测高精度的影响, 试验将拟合的大气修正系数  $k$  代入雷达数据处理测高公式对距离进行分段处理, 雷达开机进行 12 h 目标样本统计, 重新统计海面方位一次目标与二次高度之差, 如图 5 所示。图 5 结果表明: 大气系数修正后的目标一次高度与二次高度超差与图 3 相比, 偏差明显变小。

#### 4 大气系数修正后高度均方根误差

大气系数修正后, 通过统计海面方位目标高度, 根据式(3), 对修正后的目标高度做均方根误差分析, 实验结果表明: 大气系数修正后目标高度均方根误差减小 50.8%。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X)^2}{n}} \quad (3)$$

式中:  $S$  为目标高度均方根误差;  $X_i$  为雷达测量高度;  $X$  为二次雷达高度。

#### 5 结论

岸基雷达测高精度受海面对流层波导和多路径条件的限制, 在海面大气参数未知的情况下, 可通过统计大量目标样本数, 根据二次雷达高度和一次目标仰角、距离测量值反演大气修正参数, 通过反演大气参数的方法提高雷达测高精度。该方法不仅适用于海面环境, 对陆地复杂气象环境也同样适用。

#### 参考文献:

- [1] BARTON D K. The low-angle tracking problem[C]// IEEE International Conference on Radar. London:IEEE, 1973:23-25.
- [2] 焦培南, 张忠治. 雷达电波环境与电波传播特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. (JIAO Peinan, ZHANG Zhongzhi. Radar wave environment and wave propagation characteristics[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007.)
- [3] TURTON J D, BENNETTS D A, FARMER S F G. An introduction to radio ducting[J]. Meteorological Magazine, 1988(117): 245-254.
- [4] 戴福山. 大气波导及其军事应用[M]. 北京:解放军出版社, 2002. (DAI Fushan. Atmospheric waveguides and military applications[M]. Beijing:Chinese People's Liberation Army Publishing House, 2002.)
- [5] 房艳燕, 王玉文, 董志伟, 等. 太赫兹波大气分层传输特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(1):1-6. (FANG Yanyan, WANG Yuwen, DONG Zhiwei, et al. Atmospheric attenuation characteristics of THz layered propagation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(1):1-6.)
- [6] HITNEY H V, RICHTER J H, PAPPERT R A, et al. Tropospheric radio propagation assessment[J]. Proceedings of the IEEE, 1985, 73(2):265-283.

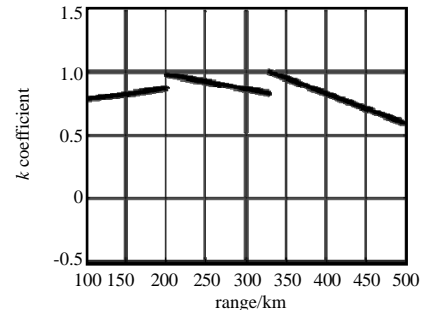


Fig.4 Relationship between atmospheric correction coefficient  $k$  and distance over the sea azimuth

图 4 海面方位大气修正系数  $k$  与距离关系

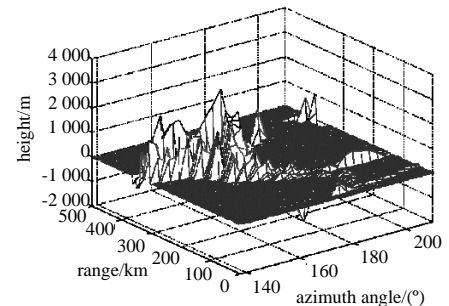


Fig.5 Deviation statistics of height measurement of the primary and secondary surveillance radar

图 5 一次高度与二次高度差统计

- [7] 朱伟,陈伯孝. 基于多径分布源模型的米波雷达测高算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):201-203. (ZHU Wei,CHEN Boxiao. Altitude measurement based on multi-path distributed source in VHF radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):201-203.)
- [8] SKOLNIK Merrill I. 雷达手册[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2003. (SKOLNIK Merrill I. Radar handbook[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2003.)
- [9] 黄小毛,张永刚,王华,等. 大气波导对雷达异常探测影响的评估与试验分析[J]. 电子学报, 2006,34(4):722-725. (HUANG Xiaomao,ZHANG Yonggang,WANG Hua,et al. Evaluation and experimental analysis of radar anomalous detection influenced by atmospheric ducts[J]. Acta Electronica Sinica, 2006,34(4):722-725.)

#### 作者简介:



张进华(1979-), 男, 湖南省新化县人, 本科, 工程师, 主要研究方向为雷达系统工程.  
email:prettyjin@163.com.

黄亮(1987-), 男, 江苏省泰州市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统工程.

范家强(1982-), 男, 南京市人, 本科, 工程师, 主要研究方向为雷达系统工程.

牛广超(1984-), 男, 河北省沧州市人, 技师, 主要研究方向为基层雷达维修和保障.

## 第十五届全国超导薄膜和超导电子器件学术研讨会

为进一步推动我国超导薄膜和超导电子器件及相关领域的研究和学术交流, 中国电子学会超导电子学分会定于2018年10月15日至18日在江西省井冈山市召开“第十五届全国超导薄膜和超导电子器件学术研讨会”。本届研讨会拟就当今国际超导电子学研究前沿领域进行深入讨论和交流。会议有关事项通知如下:

### 一、会议主题

- 1、超导薄膜及其他材料;
- 2、超导传感器探测器及其应用;
- 3、超导无源器件及其应用;
- 4、新型超导量子器件与电路;
- 5、超导电子学关联技术与应用。

### 二、时间与地点

会议日期: 2018年10月15~18日 15日报到注册

会议地点: 江西省井冈山市(具体地点另行通知)

### 三、主办单位: 江西省科学技术协会和中国电子学会超导电子学分会

承办单位: 华东交通大学和西安交通大学

### 四、重要日期及安排

2018年6月15日 会议第二轮通知及网站开放注册

2018年8月15日 注册和论文摘要投稿截止

2018年9月15日 会议议程确定, 投稿论文截止

### 五、联系方式

刘海文教授	联系电话: 13870666060	Email: hwliu1975@mail.xjtu.edu.cn
官雪辉教授	联系电话: 13970871029	Email: guan@ecjtu.edu.cn
刘少敏分会秘书	联系电话: 15256532526	Email: cetc16_htsc@163.com
任宝平博士	联系电话: 15870672023	Email: rbp2008@126.com